

Nestacionarne temperaturne promjene u sušionicama pri njihovom ohlađivanju

Mr Miljenko Primorac, prof. ing. Đuro Hamm
Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

UDK 634.0.847

Prispjelo: 21. 03. 1983.

Prethodno priopćenje

Prihvaćeno: 25. 04. 1983.

Sažetak

U radu je obrađen teorijski pristup brzini hlađenja sušionice u ovisnosti o konstruktivnim i toplinsko-fizikalnim osobitostima stijenke sušionice. Ukazuje se na to da nije dovoljno poznavati samo izolacijske osobitosti stijenke nego treba voditi računa i o koeficijentu njihove temperaturne vodljivosti. Važna je toplinsko-akumulacijska sposobnost stijenke u slučajevima zagrijavanja na prekide, naročito za sušionice koje koriste isključivo sunčanu energiju. U ovom radu uzet je model toplinski »prazne« sušionice zbog ispitivanja ponašanja samih stijenki. Riješena je odgovarajuća diferencijalna jednadžba, a rješenje je primijenjeno na konkretne slučajeve.

Ključne riječi: sušionica drva — nestacionarno vođenje topline — toplinska stabilnost — sunčana energija.

NON-STATIONARY TEMPERATURE CHANGES IN DRYING WOOD CHAMBERS DURING THEIR COOLING-OFF PERIOD

Summary

The paper treats a theoretical approach to the course of cooling-off period of the drying chamber for wood depending on constructional and thermo-physical qualities of the walls of the drying chambers. It is not enough to know the insulation qualities of the walls. We must also consider the coefficient of the temperature conductivity. Thermoacumulative quality of the walls has a great importance in the case of time-limited heating, especially for the wood drying chambers which would use exclusively solar energy, during the definite periods of time. A thermal empty drying chamber has been taken as a model because we wanted to test the behavior of the walls. The corresponding differential equation has been solved and its result applied to the concrete cases.

Key words: wood drying chambers — non stationary conducting of thermal energy — thermal stability — solar energy.

UVOD

U posljednje se vrijeme sve više grade sušionice montažnog tipa, a napuštaju se zidane klasičnog tipa. Stijenke montažnih sušionica obično su izolirane staklenom vunom ili nekim drugim materijalom s visokim izolacijskim osobitostima male toplinske vodljivosti i s relativno tankim limenim stijenkama. S druge strane, zidane sušionice imaju veći koeficijent toplinske vodljivosti λ , ali su im i stijenke znatno deblje. Unatoč te debljine, toplinski su gubici veći od onih montažnog tipa. Kada je uspostavljeno stacionarno stanje, u homogenoj stijenki gradijent tempera-

ture ovisi samo o debljini stijenke [1], a potpuno je neovisan o osobitostima materijala iz kojega je stijenka izgrađena. Međutim, prije (ili poslije) nego li je ustaljeno stanje postignuto, toplina koja struji kroz stijenku morat će najprije zagrijavati (hladiti) slojeve stijenke, a to zagrijavanje (hlađenje) mora ovisiti i o koeficijentu toplinske vodljivosti i o toplinskom kapacitetu sloja koji se zagrijava. Ako se tako promatra brzina ohlađivanja, onda te dvije veličine dolaze do izražaja. Utjecaj tih veličina je presudan u onim momentima kada se sušionica ostavi u stanju mirovanja (zbog nestanka ili štednje električne energije u momentima vršnih opterećenja ili pomanjkanja

sunčanosti — noću — za sušionice na sunčanu energiju bez uključivanja alternativnog izvora i sl.) O njima ovisi kako će se brzo sušionica hladiti i kada će se dostići točka rosišta, što je bitno za tehnologiju sušenja. Zbog toga se u ovom radu promatra ponašanje i traži njegova zakonitost.

Model sušionice i rješavanje problema

Želi se ispitati brzina hlađenja sušionice u ovisnosti o toplinskim osobitostima stijenke sušionice. Da bi se to moglo jasno uočiti bez nekih drugih utjecaja, pogodno je uzeti praznu sušionicu i toplinski kapacitet zraka zbog neznačajnosti zanemariti. To znači da je temperatura unutarnje plohe stijenke jednaka temperaturi zraka u sušionici. Osim toga neka se pretpostavi da je temperatura u svakoj točki prostora sušionice u svakom momentu jednaka. Slijedeća pretpostavka je da toplina jedino prolazi okomito na površinu stijenki (beskonačna ploha), i da je taj toplinski tok jednak kroz ove stijenke, tj. ostvarena je prostorna izotermnost u svakom trenutku. To znači: kako se mijenja temperatura u jednoj točki, tako se mijenja u svakoj točki prostora, a jednaka je temperaturi unutarnje površine stijenke. Takvo se stanje u praznim sušionicama može aproksimativno uzeti sve do temperature rosišta. Za homogenu stijenku debljine δ na nekom mjestu x , ako je toplinski tok okomit na nju, vrijedi diferencijalna Fourierova jednadžba u obliku:

$$\frac{\delta t}{\delta \tau} = - \frac{\lambda}{c \rho} \frac{\delta^2 t}{\delta x^2}, \quad (1)$$

gdje je t temperatura koja je funkcija koordinate x i vremena τ . Usmjerenje osi x odabrano je u pravcu pada temperature, a to znači okomito na stijenku sušionice iz unutrašnjosti prema vani. Ishodište je pogodno odabrati na unutarnjoj plohi stijenke. Zbog toga je $\delta^2 t / \delta x^2$ pozitivna veličina. Također su pozitivne veličine:

λ — toplinska vodljivost;

c — specifični toplinski kapacitet;

ρ — gustoća materijala stijenke zida.

Budući da se radi o hlađenju, vremenski gradijent temperature mora biti negativan, pa se zbog toga u (1) pojavljuje predznak minus.

$$\text{Veličina u jednadžbi (1) } a = \frac{\lambda}{c \rho} \quad (2)$$

jest koeficijent temperaturne vodljivosti ili difuznost temperature. Rješenje prostorno-vremenske

parcijalne diferencijalne jednadžbe može se potražiti u formuli:

$$t(x, \tau) = C_1 \exp[-b_1 x - b_2 \tau] + C_2. \quad (3)$$

Takvo se parcijalno rješenje uvrsti u jednadžbu (1) i uvjet zadovoljavanja daje vezu između b_1 i b_2 :

$$b_2 = a b_1^2. \quad (4)$$

Preostale se jednadžbe za neodređene konstante C_1 , b_1 , b_2 i C_2 dobiju iz rubnih uvjeta:

za $x = 0$ i $\tau = 0$

$t = t_{pu}$ — početna temperatura unutarnje stijenke;

$x = \delta$ i $T = 0$

$t = t_{pv}$ — početna temperatura vanjske stijenke;

$x = 0$ i $\tau = \infty$

$t = t_0$ — temperatura okoline;

$x = \delta$ i $\tau = \infty$

$t = t_0$ — temperatura okoline.

Uvrštavanjem tih uvjeta u (3) dobije se:

$$\begin{aligned} t_{pu} &= C_1 + C_2, \\ t_{pv} &= C_1 \cdot e^{-b_1 \delta} + C_2, \\ t_0 &= C_2. \end{aligned} \quad (5)$$

Jednadžbe (5) daju $C_1 = t_{pu} - t_0$, (6)

$$b_1 = \frac{1}{\delta} \ln \frac{t_{pu} - t_0}{t_{pv} - t_0}, \quad (7)$$

i zbog (4)

$$b_2 = \frac{a}{\delta^2} \left[\ln \frac{t_{pu} - t_0}{t_{pv} - t_0} \right]^2. \quad (8)$$

Poznavanjem konstanti C_1 , C_2 , b_1 i b_2 analitičko rješenje (3) jednadžbe (1) je potpuno određeno. Zgodno je uočiti da konstanta b_1 uz prostornu koordinatu x ne ovisi o toplinskim osobitostima sadržanim u veličini a , kao što ovisi konstanta b_2 uz vremensku koordinatu.

Rješenje (3) odnosi se na temperaturu Celzijevske skale, ali također i na temperaturu u Kelvinima, tj. neovisno je o temperaturnoj skali. Vrijeme τ_r za koje se postigne temperatura rošenja t_r na unutarnjoj stijenki, navedeno je formulom

$$\tau_r = \frac{1}{b_2} \ln \frac{t_{pu} - t_0}{t_r - t_0}, \quad (9)$$

Rješenja (3) i (9), uz ostale navedene uvjete, omogućuju nam proračun toplinske energije koja se oslobodi iz stijenke zida površine A pri ohlađivanju do temperature rosišta. Shvatimo li stijenku zida sastavljenju iz homogenih uzdužnih izotermnih slojeva debljine Δx , tada je iz sloja na mjestu x oslobođena toplina ΔQ , od početka do trenutka postizanja rosišta τ_r , određena formulom

$$\Delta Q = c \rho A [t(x, 0) - t(x, \tau_r)] \Delta x. \quad (10)$$

U početnom trenutku, kao granici stacionarne i nestacionarne temperaturne promjene, može se uzeti stacionarna temperaturna zakonitost koja je linearna:

$$t(x, 0) = t_{pu} - \frac{t_{pu} - t_{pv}}{\delta} x. \quad (11)$$

Temperaturna zakonitost za trenutak τ_r , u sloju koordinate x na osnovu (9) i (3) je

$$t(x, \tau_r) = (t_r - t_0) \exp(-b_1 x) + t_0. \quad (12)$$

Prelaskom na diferencijalni oblik u (10) i uvrštavanjem (11) i (12), te integracijom u granicama od 0 do δ , dobije se za ukupnu toplinsku energiju Q , koja se oslobodi iz zida površine A pri hlađenju do temperature rosišta

$$Q = c \rho A [(t_{pu} + t_{pv} - 2t_0) \delta / 2 - (t_r - t_0) [1 - \exp(-b_1 \delta)] / b_1]. \quad (13)$$

Proračun sušionice prema ovom modelu

Da bi se kvantitativno uočila toplinska stabilnost sušionica u ovisnosti o toplinskim osobitostima građevnoga materijala njihovih stijenki, načini se proračun za konkretne slučajeve.

Uzme se primjer samostojeće sušionice (samo-stojeća komora): okolina je atmosfera (kao beskonačni spremnik topline) čija je temperatura na primjer $t_0 = -15^\circ \text{C}$, kolika je i temperatura ispod sušionice. Ta se temperatura vremenski ne mijenja. Pretpostavimo da su sve stijenke (uključujući i pod i strop) građene jednako, tj. imaju temperaturnu vodljivost a , što bi značilo da je toplinski tok jednak u svim točkama ploha sušionice (viseća sušionica, sušionica izdignuta iznad zemlje). Daljnji uvjet je da je sušionica prazna, uz zanemarivanje toplinskoga kapaciteta zraka u njoj, i da je temperatura zraka jednaka temperaturi unutarnje plohe stijenke sušionice.

Ovakva aproksimacija je relativno dosta gruba, ali je potrebna da bi se moglo izdvojeno promatrati utjecaj građe stijenki na toplinsku stabilnost sušionice. Na ovakav model može se, uz zanemarivanje efekata u sjecištima stijenki, primijeniti model beskonačno ravne homogene stijenke konačne debljine, kroz koju se temperatura mijenja po formuli (3). U svim primjerima proračuna sušionica neka se uzmu jednaki vanjski i unutarnji uvjeti. Dakle, vanjska temperatura $t_0 = -15^\circ \text{C}$, početna unutarnja temperatura 80°C , rosište 45°C , (početna relativna vlažnost $\varphi = 20\%$) a vanjski koeficijent konvekcije $\alpha = 10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Znači, jedino po čemu se sušionice razlikuju neka su veličine temperaturne difuznosti a , i debljina stijenki δ . Za primjer se ovdje uzimlju tri vrste sušionica.

Sušionica 1.

Građena od pune opeke, debljine zida: $\delta = 25 \text{ cm}$ i $a = 4,495 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ($\lambda = 0,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\rho = 1700 \text{ kg m}^{-3}$ i $c = 1047 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ prema [2]): koeficijent prolaza topline u trenutku $\tau = 0$ pri stacionarnom stanju je:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda}} = 2,42 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1},$$

$$t_{pv} = t_0 + \frac{k}{a} (t_{pu} - t_0) = -8^\circ \text{C},$$

$$b_1 = \frac{1}{0,25} \ln \frac{80 + 15}{-8 + 15} = 10,4319 \text{ m}^{-1},$$

$$b^2 = 4,2912 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1} = 1,7608 \cdot 10^{-2} \text{ h}^{-1}.$$

Temperatura se unutarnje plohe na mjestu $x = 0$, t_u mijenja po formuli:

$$t_u = t(0, \tau) = 95 \cdot \exp[-1,7608 \cdot 10^{-2} \tau] - 15.$$

Vrijeme treba biti izraženo u satima da bi temperatura bila u $^\circ \text{C}$. Temperatura vanjske plohe t_v , tj. $x = \delta = 0,25 \text{ m}$, mijenja se s vremenom:

$$t_v = t(0,25, \tau) = 95 \cdot \exp[-2,608 - 0,017608 \tau] - 15.$$

Analogno se račun može provesti za temperaturu bilo koje plohe unutrašnjosti zida. U tablici I su navedene neke vrijednosti temperature t_u i t_v kao funkcije vremena izraženog u satima, a grafički su prikazane na sl. 1 temperatura u unutrašnjosti i na vanjskoj stijenki sušionice S_{iu}

i S_{1v} . Temperatura rošenja postigne se za 26 sati hlađenja. U tom vremenu je oslobođena, prema (13), toplinska energija od 13,2 MJ/m² zida.

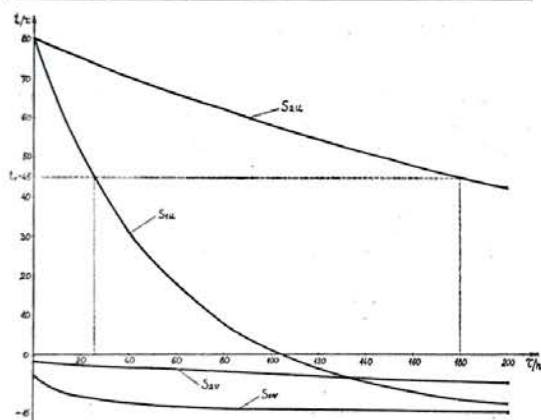
TABLICA I

Ohlađivanje sušionice 25 cm debelih stijenki u ovisnosti o vremenu

TABLE I

Cooling of the wood drying chambers, with the walls of brick 25 centimeters in thickness, in relation with time.

T/h	0,5	0,75	1	2	5	10	26	50
$t_u/^\circ\text{C}$	79,2	78,7	78,3	76,7	72	64,7	45,1	24,4
$t_v/^\circ\text{C}$	-8,06	-8,09	-0,12	-8,24	-8,59	-9,13	-10,57	12,1



Slika 1. Opadanje temperature zidanih sušionica.

Fig. 1. The decrease of temperature in the brick-bull chambers for drying wood.

Sušionica 2.

Građena je od pune opeke debljine $\delta = 50$ cm. Temperaturna vodljivost je $a = 4,4956 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, jednaka kao i u sušionice 1., usporednom će se moći vidjeti utjecaj debljine stijenke. Ostali podaci: $k = 1,379 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$, $t_{pv} = -1,90^\circ\text{C}$ (uz jednaki $\alpha = 10 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ kao i kod sušionice 1.), $b_1 = 3,961 \text{ m}^{-1}$, $b_2 = 2,5387 \cdot 10^{-8} \text{ h}^{-1}$. Unutarnja temperatura t_u i vanjska temperatura t_v s vremenom se mijenjaju:

$$t_u = t(0, \tau) = 95 \cdot \exp[-0,0025387 \tau] - 15,$$

$$t_v t(\delta, \tau) = 95 \cdot \exp[-1,9805 - 0,0025387 \tau] - 15.$$

Vrijeme treba biti izraženo u satima da bi temperatura bila u $^\circ\text{C}$.

U tablici II navedene su neke vrijednosti t_u i t_v kao funkcije vremena, a na sl. 1. krivuljama S_{2u} i S_{2v} prikazani su njihovi grafovi odakle se

vidi gotovo linearno ponašanje. Vrijeme za koje se postigne rosište jest 181 sat ($\approx 7,5$ dana). U tom vremenu oslobodi se količina topline od 24,9 MJ/m² zida.

TABLICA II

Ohlađivanje sušionice 50 cm debelih stijenki od opeke u ovisnosti o vremenu.

TABLE II

Cooling of the wood drying chambers, with the walls made of brick 50 centimeters in thickness, in relation with time.

τ/h	1	2	10	100	181	500	1000
$t_u/^\circ\text{C}$	79,8	79,5	77,6	58,7	45	11,7	-7,5
$t_v/^\circ\text{C}$	-1,92	-1,96	-2,22	-4,83	-6,47	-11,3	-13,96

Sušionica 3.

Montažna, s izolacijom od staklene vune, debljine 6 cm ($\lambda = 0,04 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$, $\rho = 200 \text{ kg/m}^3$, $c = 837 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), a toplinska uloga limene obloge može se zanemariti zbog velikog λ i male debljine, tako da ga možemo shvatiti kao vanjske plohe staklene vune. (Napomenimo da su podaci za λ , i ρ različiti u različitim toplinskim tablicama, pa su ovdje približne vrijednosti, kao i za prethodne sušionice). Ostale potrebne veličine su: $k = 0,625 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$, $t_{pv} = -9^\circ\text{C}$, $b_1 = 46,203 \text{ m}^{-1}$, $a = 23,895 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ i $b_2 = 1,836 \text{ h}^{-1}$.

Ako usporedimo veličinu b_2 , koja je direktno vezana za vremensku ovisnost, s istim veličinama prethodnih sušionica, ona je ovdje za dva reda veličine veća od prve, a čak za tri reda veličine veća od druge sušionice, dok je sama temperatura difuznosti veća samo za jedan red veličine.

U isto vrijeme za koeficijent prolaza topline k četiri odnosno dva puta manji u odnosu na prvu odnosno drugu sušionicu. U ovom slučaju se unutarnja temperatura t_u i vanjska temperatura t_v s vremenom mijenjaju po formuli $t_u = 95 \cdot \exp[-1,836 \tau]$, $t_v = 95 \exp[-2,772 - 1,836 \tau]$.

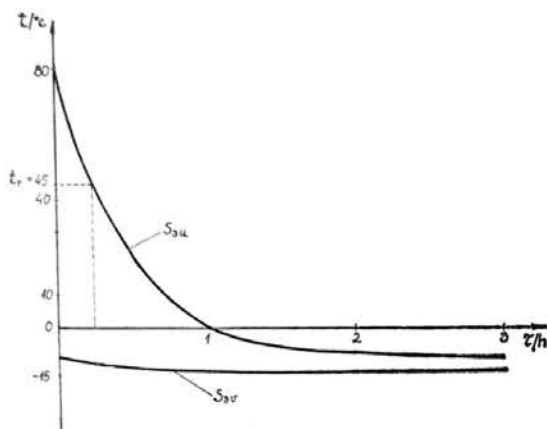
TABLICA III

Ohlađivanje montažne sušionice u odnosu na vrijeme.

TABLE III

Cooling of prefabricated chambers for drying wood in relation with time.

τ/h	0,2	0,25	0,5	0,75	1	3
$t_u/^\circ\text{C}$	50,8	45	22,9	9	0,1	-14,6
$t_v/^\circ\text{C}$	-10,88	-11,25	-12,63	-13,50	-14,05	-14,97



Slika 2. Opadanje temperature montažnih sušionica u ovisnosti o vremenu.

Fig. 2. The decrease of the temperature in prefabricated chambers for drying wood in relation with time.

Neke vrijednosti temperature navedene su u Tablici III, a njihovi grafovi na slici 2. Izgleda nevjerovatno kojom brzinom pada temperatura u ovom slučaju. Rosište se postigne već za 15 minuta, dok se npr. u sušionici 1 rosište postigne za 26 sati, a u drugoj sušionici nakon 7,5 dana. Sa stajališta tehnologije sušenja drva, to je činjenica koja se ne bi smjela zanemarivati, unatoč tomu što su u ovom primjeru toplinski gubici pri ustaljenom radu nekoliko puta manji. Termoakumulacijska energija koja se oslobodi iz stijenke površine 1 m^2 do postizanja rosišta ovdje je $0,33 \text{ MJ}$, što je 40 puta manje nego kod prve i 75 puta manje kod druge sušionice.

Termostabilnost sušionica zagrijvanih sunčanom energijom

Pri projektiranju sušionica koje bi u pogodnim vremenskim razdobljima bile zagrijavane isključivo sunčanom energijom, važno je iz tehnoloških i energetskih razloga voditi računa o njihovoj toplinskoj stabilnosti. Tu je bitno da se kroz dulje vrijeme (preko noći ili periodično manje sunčanosti) temperatura u sušionici što manje snizi, a nikako do temperature rosišta.

Neka se promatra ponašanje sušionica u već navedenom modelu kroz period od 10 sati bez dovodenja energije, a početna unutarnja temperatura je 80°C i vanjska $+15^\circ \text{C}$. Neka se to primijeni na već spomenuta tri tipa sušionica i s jednakim veličinama kao i ranije, izuzev temperature i veličine na koje ona utječe. Sušionici 1. (sl. 1), sa stijenka debljine 25 cm , građene od opeke, nakon 10 sati smanji se temperatura za $3,3^\circ \text{C}$, dok se kod sušionice 2. (S2), kojoj su stijen-

ke 50 cm od opeke, smanjuje temperatura za $1,6^\circ \text{C}$. Kod sušionice 3. (S3), montažnog tipa, sa 6 cm debelim stijenka od staklene vune, temperatura se izjednači s vanjskom čak ako se konstanta temperaturne difuznosti smanji dva do tri puta.

Tu valja imati na umu da ovo vrijedi za prazne sušionice. Očito je da u slučaju S1 i S2 praktično nema smanjenja temperature. Tu treba uzeti u obzir da se stijenke sušionice S1 i S2 sporije zagrijavaju i pri tom trebaju više energije nego S3. Međutim, ta energija se uzima onda kad je najviše ima, kad je sunčanost najveća. Pri tom ne treba imati posebno osjetljivu automatiku kao kod S3, gdje bi se u toku jake sunčanosti moralo češće uključivati i isključivati grijanje (ovisno o veličini kolektora i izmjenjivača topline). U vremenu dovodenja topline, energetski gubici kod montažnih sušionica su dva do tri puta manji, ali, budući da je sunčeva energija besplatna, to ne predstavlja neki problem kao što predstavlja toplinska difuznost.

Zaključak

Uspoređivanje dobivenih karakterističnih vrijednosti ukazuje na vrlo slabu toplinsku stabilnost montažnih sušionica. Da bi montažna sušionica imala jednaku toplinsku stabilnost kao i ona koja je izgrađena od zida iz opeke, trebala bi imati deblju stijenku više nego dvostruku od debljine zida od opeke. To svakako ne bi bilo investicijski racionalno. Zbog toga današnje montažne sušionice mogu biti vođene samo automatikom, i to onom koja brzo reagira. Prilikom prekida električne struje (ili nekih drugih sličnih uzroka), temperatura zraka sušionice uz stijenku relativno brzo pada na temperaturu rosišta. Ovo je znatno izraženije kod sušionica kojima je izmjenjivač topline postavljen u prostoru ispod stropa. Kod njih nema termosifonskog uzgona, koji bi usporavao hlađenje kao u slučaju zagrijavanja ispod složaja građe.

S druge strane, montažne sušionice imaju redovito dobru izolaciju, pa su energetski gubici znatno manji. Znači, postoje i prednosti i nedostaci jednoga i drugoga tipa sušionica, pa je rješenje u kombiniranju njihovih dobrih strana za svaki konkretni slučaj namjene, režima i trajanja sušenja.

LITERATURA

- [1] BOŠNJAKOVIĆ, F.: Nauka o toplini II dio. Tehnička knjiga, Zagreb 1976, str. 118. relacija (85).
- [2] RA2NJEVIĆ, K.: Termodinamičke tablice. Školska knjiga, Zagreb 1975.